

雁荡山世界地质公园火山作用研究

余明刚¹, 邢光福¹, 沈加林¹, 陈 荣¹, 周宇章¹, 隗合明², 陶奎元¹

(1. 南京地质矿产研究所, 江苏 南京 210016; 2. 长安大学 地球科学系, 陕西 西安 710054)

摘 要: 雁荡山世界地质公园位于浙江省东南部, 主体为一白垩纪火山岩浆活动形成的复活破火山, 由 4 个火山岩性段和 1 个中央侵入体构成, 经历了 4 期喷发、2 次塌陷、1 次侵入、现代地貌形成等共 8 个演化阶段。火山岩为以流纹质和粗面英安质为主的高钾钙碱性系列岩石组合, 中央侵入体为橄榄安粗岩系列石英正长斑岩, 它们的 A/CNK 值集中在 0.9~1.2 之间, 为铝饱和或铝过饱和类型。岩石富集轻稀土元素和大离子亲石元素, 相对亏损高场强元素, δEu 值为 0.11~0.32, 表明岩浆经历了以斜长石为主的强烈结晶分异作用; 火山岩($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) 为 0.707 9~0.716 1, $\epsilon\text{Nd}(t)$ 为 -6.90~-7.70, 中央侵入体石英正长斑岩($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) 为 0.708 6~0.709 8, $\epsilon\text{Nd}(t)$ 为 -7.10~-7.68, 表明它们是同源岩浆不同阶段分异演化的产物, 物质来源主要为陆壳, 但也有地幔物质参与。它们形成的大地构造背景, 不是典型的岛弧或安第斯型活动大陆边缘, 而是活动大陆边缘靠板内的环境。

关键词: 构造背景, 岩浆成因, 破火山, 雁荡山世界地质公园

中图分类号: P588.14, P511.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2008)02-0101-12

Volcanism of the Yandang Mountain World Geopark

YU Ming-gang¹, XING Guang-fu¹, SHEN Jia-lin¹, CHEN Rong¹, ZHOU Yu-zhang¹, WEI He-ming²
and TAO Kui-yuan¹

(1. Nanjing Institute of Geology and Mineral Resources, Nanjing 210016, China; 2. Department of Earth Science, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: The Yandang Mountain World Geopark situated in southeastern Zhejiang Province is mainly a Cretaceous resurgent caldera composed of four volcanic rock sections and one central intrusive body. It has undergone four stages of eruption, two collapses, one intrusion and the formation of modern landscape, comprising totally eight evolution phases. Volcanic rocks are of the high-K calc-alkaline series rock association, composed mainly of rhyolitic and trachytic dacitic rocks, and the central intrusive body is olivine-andesite-trachytic quartz syenitic porphyrite. They have A/CNK values of 0.9~1.2, suggesting aluminum saturation or oversaturation, and are enriched in LREE and LILEs and depleted in HFSEs. Their δEu values are 0.11~0.32, evidently indicating plagioclase fractional crystallization. ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i ratios and $\epsilon\text{Nd}(t)$ values are 0.707 9~0.716 1 and -6.90~-7.70 for volcanic rocks, and 0.708 6~0.709 8 and -7.10~-7.68 for quartz syenitic porphyrite, respectively, implying that all the igneous rocks from the Yandang Mountain were evolutionary products of co-magmas, and derived mainly from the crust, mixed however with mantle components. The tectonic setting is an active continental margin close to the inner continent instead of a typical island arc or an Andean-type active continental margin.

Key words: tectonic setting; magma origin; caldera; the Yandang Mountain World Geopark

收稿日期: 2007-08-20; 修订日期: 2007-10-23

基金项目: 国土资源部国土资源大调查项目(1212010610611), 国土资源部“百人计划”第三批资助项目

作者简介: 余明刚(1978-), 男, 助工, 主要从事中国东南沿海中、新生代火山岩浆活动研究, E-mail: ymg1003@126.com; 通讯作者: 邢光福, E-mail: njxguangfu@cgs.gov.cn

雁荡山世界地质公园位于浙东南乐清市、永嘉县、温岭市境内,是中国东南沿海第一个以火山为主题的世界地质公园,主体为一白垩纪火山岩浆活动形成的复活破火山,以发育巨厚的流纹质火山岩为特征,是流纹质火山岩浆作用的天然博览园。破火山外围地层为磨石山群高坞组和西山头组火山岩以及永康群馆头组和朝川组火山-沉积地层。雁荡山地区地质调查研究程度较高,自上世纪 70 年代末至 90 年代先后完成了 1/20 万、1/5 万和 1/25 万区域地质调查;并且,作为中国东南沿海火山岩带中大型火山机构,雁荡山破火山的火山构造典型并保存相对完好,火山岩相种类齐全,前人也做过解剖性研究(杜杨松等,1989;王中杰等,1989;谢家莹等,1996;冯长根等,1997;陆志刚等,1997;陶奎元等,2000,2004;王孔忠等,2001),但在根据雁荡山破火山的不同形成阶段系统探讨雁荡山火山岩浆的成因与演化过程及其构造背景方面尚有欠缺。

1 火山地质作用

雁荡山破火山发育史极为复杂,包括两次破火山形成与复活,这在东南沿海火山岩带的众多火山机构中是相当罕见的,而且火山活动十分强烈,在相对较短的时期内喷出厚达 2 000 m 的早白垩世永康群小平田组火山岩[不同时期喷出的火山岩锆石 SHRIMP 年龄为 98~104 Ma,且各组年龄在误差范围内基本一致,关于其时代与层位厘定见余明刚等(2006)],且以单一流纹质岩浆爆发为特色,形成了奇异的火山地貌景观。雁荡山火山岩层据其岩性岩相变化,自下而上可划分为 4 个岩性段(K_1y^1 、 K_1y^2 、 K_1y^3 、 K_1y^4),它们在平面上呈环状分布,地层叠置关系清楚,末期岩浆沿主要火山通道侵位,构成中央侵入体(K_y) (图 1)。结合以往不同比例尺区调资料及科研成果,笔者将雁荡山破火山形成演化的历史总结为 8 个阶段,包括 4 期喷发、2 次破火山口塌陷与复活、1 期侵入以及现代地貌形成等过程。

(1)第 1 次喷发阶段:大规模普林尼式爆发,喷出厚层火山碎屑流相低硅流纹质熔结凝灰岩,形成第 1 岩性段(K_1y^1),出露面积约 66 km²,厚度 688 m,平面上出露于破火山最外环。

(2)第 1 次破火山形成阶段:大体积 K_1y^1 爆发

之后,岩浆房排空,引发火山口塌陷,导致 K_1y^1 岩层产状围斜内倾,并形成环状和放射状断裂,岩浆沿上述断裂侵位,形成侵出相英安流纹质凝灰熔岩岩穹。在智仁一带的破火山口湖中发生局部蒸气岩浆爆发,形成涌流相凝灰岩,厚度仅 19.6 m。

(3)第 2 次喷发阶段:为早期破火山复活阶段,呈大规模喷溢流式爆发,喷出溢流相厚层流纹岩,形成第 2 岩性段(K_1y^2),构成雁荡山主要景点。局部普林尼式爆发,形成火山碎屑流相熔结凝灰岩,晚期还有侵出相流纹斑岩岩穹。出露面积为 59 km²,厚度大于 600 m,与下伏 K_1y^1 地层角度不整合接触,平面上出露于破火山中间环。

(4)第 3 次喷发阶段:小规模亚普林尼式喷发,产物为火山碎屑流相熔结凝灰岩、凝灰岩,局部夹有溢流相流纹岩,形成第 3 岩性段(K_1y^3),出露面积约 27 km²,厚度 380 m,平面上构成破火山内环。

(5)第 4 次喷发阶段:为雁荡山最后一次全区性普林尼式猛烈爆发,形成火山碎屑流相流纹质熔结凝灰岩,局部有溢流相凝灰熔岩,构成第 4 岩性段(K_1y^4)地貌上呈山巅和山脊。与 K_1y^3 共同构成破火山内环,出露面积约 50 km²,厚度 297 m,分布于破火山内环。

(6)第 2 次破火山形成阶段:在第 2 到第 4 次大体积岩浆爆发之后,岩浆房排空,火山口再次发生塌陷,导致 K_1y^2 、 K_1y^3 、 K_1y^4 火山岩层产状围斜内倾,并与 K_1y^1 地层之间呈角度不整合。

(7)中央侵入体形成阶段:为晚期破火山复活阶段,岩浆沿主要喷发中心上升侵位形成中央侵入相石英正长斑岩(K_y)。后期有英安玢岩、流纹斑岩、斜长霏细斑岩、霏细斑岩等酸性岩墙和岩脉沿破火山环形与放射状断裂侵入。

(8)现代地貌景观形成阶段:中央侵入体侵位后,雁荡山地区岩浆活动全面结束,进入长期风化剥蚀阶段,期间上覆火山岩顶盖遭剥蚀而暴露中央侵入体,最终形成如今地貌景观。

手标本观察和薄片鉴定结果表明:雁荡山火山-侵入杂岩的主要造岩矿物为钾长石、斜长石、石英、黑云母以及少量的角闪石、斜方辉石、单斜辉石等。人工重砂分析表明,主要副矿物为锆石、磷灰石、钛铁氧化物以及少量的萤石、楣石等,副矿物总量及锆石含量随 SiO₂ 含量的增加而降低(表 1)。

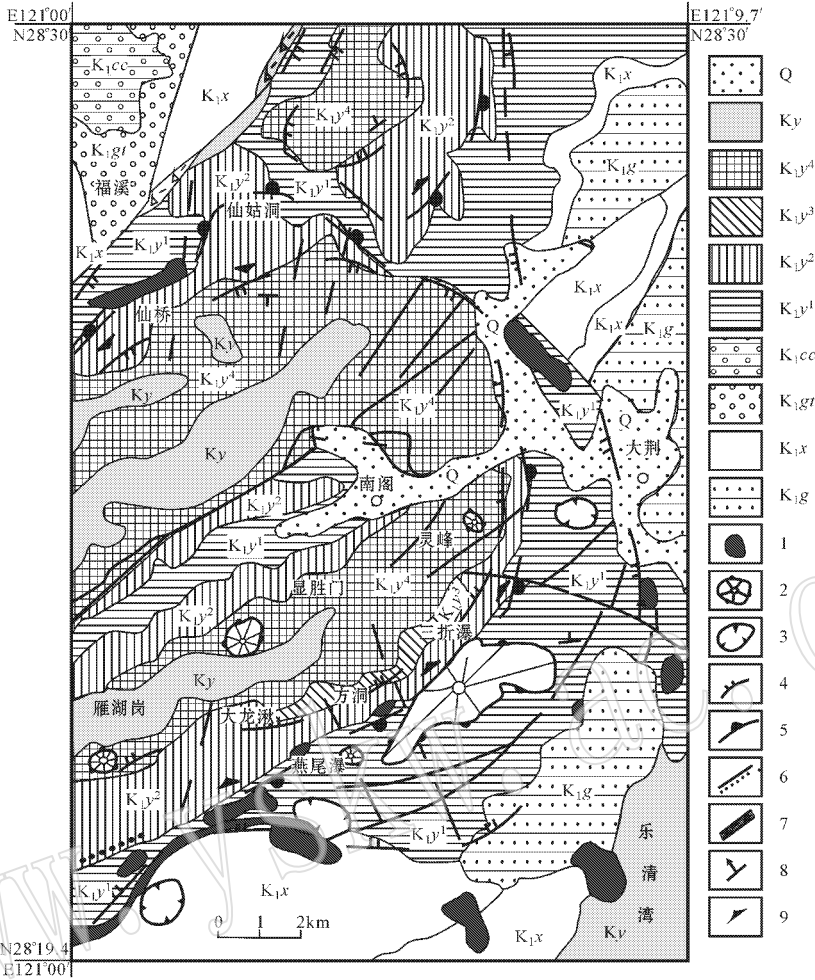


图 1 雁荡山地质略图(据内部资料^①简化)

Fig. 1 Geological sketch map of the Yandang Mountain(modified after restricted data^①)

Q—第四系；K_{1y}¹—第 1 岩性段；K_{1y}²—第 2 岩性段；K_{1y}³—第 3 岩性段；K_{1y}⁴—第 4 岩性段；K_y—中央侵入体；K_{1cc}—朝川组；K_{1gt}—馆头组；K_{1x}—西山头组；K_{1g}—高垟组；1—一次火山岩、岩脉；2—侵出岩穹；3—火山通道；4—破火山边界环状断裂；5—岩流、岩穹组合边界；6—断裂；7—破碎带；8—假流纹产状；9—流面产状

Q—Quaternary；K_{1y}¹—1st Member；K_{1y}²—2nd Member；K_{1y}³—3rd Member；K_{1y}⁴—4th Member；K_y—central intrusive body；K_{1cc}—Chaochuan Formation；K_{1gt}—Guantou Formation；K_{1x}—Xishantou Formation；K_{1g}—Gaowu Formation；1—subvolcanic rocks and veins；2—extrusive dome；3—volcanic conduit；4—caldera boundary and ring fault；5—lava flow and done boundary；6—fault；7—fracture zone；8—attitude of pyroclastic flow；9—attitude of lava flow

表 1 雁荡山火山-侵入杂岩主要副矿物含量表

mg/3kg

Table 1 Accessory mineral contents of volcano-intrusive complex in the Yandang Mountain

样品号	层位	锆石	磷灰石	榍石	萤石	褐帘石	金红石	斜方辉石	钛铁氧化物	总量
04Yd-01	K _{1y} ¹	97	50	1.5					8 971.5	9 120.0
04Yd-02	K _{1y} ²	16.7	△		35.2		-		2 615.4	2 667.3
04Yd-03	K _{1y} ³	117	11.4		△	+			7 880.0	8 008.4
04Yd-04	K _{1y} ⁴	10	0.5		35	△	-	77.5	2 864.2	2 987.2
04Yd-05	K _y	266	72.5	△		518			18 258.0	19 114.5

表中“ - ”表示 1~5 粒；“ + ”表示 5~10 粒；“△”表示 21~50 粒，人工重砂由廊坊地质实验室分析。

① 国土资源部. 2004. 拟建中国雁荡山世界地质公园综合考察报告.

$w_{\text{P}}/\%$

表2 雁荡山火山-侵入杂岩全岩化学成分

Table 2 Chemical composition of volcano-intrusive complex in the Yandang Mountain

岩性段 序号 样号 岩石名称	$K_{1,y}^1$										$K_{1,y}^2$										$K_{1,y}^3$										$K_{1,y}^4$										K_y						
	1	2*	3*	4*	5*	6*	7*	8	9*	10*	11	12*	13*	14*	15*	16	17*	18*	19*	20*	21	22*	23*	WT	VT	CVWT	CVWT	S3	S4	S5	S6	04Yd-02	S7	S8	04Yd-03	S9	S10	S11	S12	04Yd-04	S13	S14	S15	S16	04Yd-05	S17	S18
SiO ₂	70.51	72.26	67.37	73.21	70.13	70.30	69.70	73.13	74.90	77.61	70.14	73.66	71.58	74.37	74.02	74.91	72.65	76.23	74.54	72.30	65.65	65.79	66.14	WT	VT	CVWT	CVWT	S3	S4	S5	S6	04Yd-02	S7	S8	04Yd-03	S9	S10	S11	S12	04Yd-04	S13	S14	S15	S16	04Yd-05	S17	S18
TiO ₂	0.40	0.25	0.27	0.24	0.46	0.37	0.40	0.23	0.14	0.20	0.38	0.30	0.32	0.14	0.43	0.20	0.28	0.24	0.17	0.30	0.59	0.47	0.46	WT	VT	CVWT	CVWT	S3	S4	S5	S6	04Yd-02	S7	S8	04Yd-03	S9	S10	S11	S12	04Yd-04	S13	S14	S15	S16	04Yd-05	S17	S18
Al ₂ O ₃	15.05	14.71	16.97	14.12	11.87	14.64	16.33	13.61	13.61	10.31	14.85	13.40	14.01	13.30	12.33	13.33	13.06	12.93	13.68	14.25	17.01	16.05	17.46	WT	VT	CVWT	CVWT	S3	S4	S5	S6	04Yd-02	S7	S8	04Yd-03	S9	S10	S11	S12	04Yd-04	S13	S14	S15	S16	04Yd-05	S17	S18
Fe ₂ O ₃	2.00	0.87	0.89	1.27	2.65	0.85	1.87	1.27	1.01	0.72	1.92	1.33	1.29	1.07	1.26	1.17	1.49	1.09	0.93	1.32	2.76	2.03	2.15	WT	VT	CVWT	CVWT	S3	S4	S5	S6	04Yd-02	S7	S8	04Yd-03	S9	S10	S11	S12	04Yd-04	S13	S14	S15	S16	04Yd-05	S17	S18
FeO	0.10	0.04	0.061	0.028	0.036	0.04	0.092	0.07	0.014	0.13	0.05	0.029	0.09	0.051	0.06	0.04	0.04	0.05	0.083	0.04	0.11	0.084	0.10	WT	VT	CVWT	CVWT	S3	S4	S5	S6	04Yd-02	S7	S8	04Yd-03	S9	S10	S11	S12	04Yd-04	S13	S14	S15	S16	04Yd-05	S17	S18
MnO	0.39	0.40	0.63	0.31	0.34	0.70	0.69	0.17	0.34	0.24	0.30	0.62	0.30	0.19	0.44	0.11	0.30	0.25	0.26	0.28	0.69	0.70	0.66	WT	VT	CVWT	CVWT	S3	S4	S5	S6	04Yd-02	S7	S8	04Yd-03	S9	S10	S11	S12	04Yd-04	S13	S14	S15	S16	04Yd-05	S17	S18
CaO	1.18	0.76	0.67	0.31	0.36	1.46	0.30	0.69	0.18	0.97	0.92	0.25	0.94	0.51	1.03	0.45	0.24	0.32	0.43	0.33	1.76	1.89	1.66	WT	VT	CVWT	CVWT	S3	S4	S5	S6	04Yd-02	S7	S8	04Yd-03	S9	S10	S11	S12	04Yd-04	S13	S14	S15	S16	04Yd-05	S17	S18
Na ₂ O	4.25	3.80	5.52	4.44	1.92	4.04	4.76	4.26	2.40	3.00	4.85	3.64	4.22	4.24	2.95	4.55	1.04	4.08	4.00	4.16	5.14	5.20	4.51	WT	VT	CVWT	CVWT	S3	S4	S5	S6	04Yd-02	S7	S8	04Yd-03	S9	S10	S11	S12	04Yd-04	S13	S14	S15	S16	04Yd-05	S17	S18
K ₂ O	5.21	4.70	5.16	4.40	6.50	5.38	4.12	5.23	5.82	4.64	4.97	5.32	5.60	5.28	5.22	4.29	9.12	4.96	5.36	5.68	5.16	5.36	4.99	WT	VT	CVWT	CVWT	S3	S4	S5	S6	04Yd-02	S7	S8	04Yd-03	S9	S10	S11	S12	04Yd-04	S13	S14	S15	S16	04Yd-05	S17	S18
P ₂ O ₅	0.07	0.01	0.06	0.03	0.10	0.07	0.06	0.02	0.004	0.038	0.07	0.038	0.044	0.014	0.072	0.02	0.03	0.024	0.004	0.046	0.120	0.150	0.18	WT	VT	CVWT	CVWT	S3	S4	S5	S6	04Yd-02	S7	S8	04Yd-03	S9	S10	S11	S12	04Yd-04	S13	S14	S15	S16	04Yd-05	S17	S18
烧失	0.66	0.67	0.91	0.87	1.01	0.86	1.41	1.19	1.62	0.83	1.41	0.73	1.31	0.38	1.13	0.62	0.61	0.27	0.37	0.73	1.10	0.71	1.00	WT	VT	CVWT	CVWT	S3	S4	S5	S6	04Yd-02	S7	S8	04Yd-03	S9	S10	S11	S12	04Yd-04	S13	S14	S15	S16	04Yd-05	S17	S18
Total	99.83	99.28	99.42	99.40	95.52	99.93	99.99	99.87	100.21	99.44	99.75	99.84	99.90	99.84	99.55	99.72	99.55	100.65	100.16	99.69	100.09	99.30	99.89	WT	VT	CVWT	CVWT	S3	S4	S5	S6	04Yd-02	S7	S8	04Yd-03	S9	S10	S11	S12	04Yd-04	S13	S14	S15	S16	04Yd-05	S17	S18
δ	3.25	2.47	4.68	2.59	2.61	3.25	2.95	2.99	2.118	1.69	3.55	2.62	3.37	2.89	2.15	2.45	3.48	2.459	2.78	3.31	4.68	4.89	3.90	WT	VT	CVWT	CVWT	S3	S4	S5	S6	04Yd-02	S7	S8	04Yd-03	S9	S10	S11	S12	04Yd-04	S13	S14	S15	S16	04Yd-05	S17	S18
K ₂ O+Na ₂ O	9.46	8.50	10.68	8.84	8.42	9.42	8.88	9.49	8.22	7.64	9.82	8.96	9.82	9.52	8.17	8.84	10.16	9.04	9.36	9.84	10.30	10.56	9.50	WT	VT	CVWT	CVWT	S3	S4	S5	S6	04Yd-02	S7	S8	04Yd-03	S9	S10	S11	S12	04Yd-04	S13	S14	S15	S16	04Yd-05	S17	S18
K ₂ O/Na ₂ O	1.23	1.24	0.94	0.994	3.39	1.33	0.87	1.23	2.425	1.55	1.02	1.467	1.33	1.253	1.77	0.947	8.77	1.22	1.34	1.37	1.00	1.039	1.11	WT	VT	CVWT	CVWT	S3	S4	S5	S6	04Yd-02	S7	S8	04Yd-03	S9	S10	S11	S12	04Yd-04	S13	S14	S15	S16	04Yd-05	S17	S18
A/CNK	1.028	1.152	1.064	1.122	1.099	0.960	1.27	0.971	0.978	0.879	0.983	1.087	0.958	0.977	1.00	1.02	1.094	1.016	1.039	1.045	0.994	0.903	1.103	WT	VT	CVWT	CVWT	S3	S4	S5	S6	04Yd-02	S7	S8	04Yd-03	S9	S10	S11	S12	04Yd-04	S13	S14	S15	S16	04Yd-05	S17	S18

表中 VWT 为玻璃屑熔凝灰岩, CWT 为晶屑熔凝灰岩, CVWT 为晶屑熔凝灰岩, TL 为流纹岩, DL 为英安流纹岩, QS 为石英正长斑岩; * 引自①, 其余样品分析在南京大学成矿作用国家重点实验室 X 射线荧光光谱仪上完成。

① 浙江省区调队, 1995, 1:5 万大荆幅、温岭县幅、虹桥镇幅、楚门镇幅区域地质调查报告。

表 3 岩石微量元素、稀土元素含量及有关比值

 $w_B/10^{-6}$

Table 3 REE and trace element abundances of the studied rocks

岩性段 序号 样品号 岩石名称	$K_{1,y}^1$			$K_{1,y}^2$		$K_{1,y}^3$			$K_{1,y}^4$			K_y		
	1	2*	3*	4	5*	6	7*	8*	9	10*	11*	12	13*	14*
	04Yd-01	S3	S5	04Yd-02	S7	04Yd-03	S9	S11	04Yd-04	S15	S16	04Yd-05	S17	S18
	WT	CVWT	CWT	R	R	WT	CVWT	AP	WT	CWT	TF	QS	QS	QS
Rb	121.03	183	268	151.39	292	107.15	208	256	151.51	224	260	58.20	256	106
Sr	201.91	113	221	18.52	31.9	68.33	101	33.8	30.54	29.7	60.2	195.94	263	
Ba	1979.14	1110	1510	383.66	326	1960.99	945	243	143.11	210	947	3171.89	2740	3030
Th	10.99	35.6	9.04	35.60	9.62	9.04	9.52	10.7	9.18	108	23.6	9.52	11.2	
Pb	29.17	62.9	80.4	62.90	18.4	80.40	51.7	106	26.46	63.7	43.0	51.70	246	
Nb	13.84	13.4	20.0	15.57	21.1	14.40	20.4	22.9	17.16	23.6	19.0	11.83	14.0	15.2
Ta	0.94	1.27	2.83	1.27	1.88	2.83	1.95	2.14	0.69	1.89	1.82	1.95	2.18	
Zr	354.55	382	334	232.49	187	372.29	296	224	194.55	193	315	560.66	599	630
Hf	8.55	5.59	8.78	11.30	6.43	8.78	8.51	7.24	11.83	6.70	9.44	8.51	12.4	
V	18.67	21.7	57.0	5.32	39.6	13.16	64.7	35.2	5.37	34.6	36.4	27.79	65.4	36.1
Y	20.34	23.4	21.5	13.94	28.80	15.25	26.4	39.5	12.18	26.70	26	20.35	24.5	26.55
Sc	3.75	6.59	5.80	1.30	4.04	2.93	4.05	3.46	1.36	3.14	4.80	6.35	8.27	
Cr	0.62			0.95		0.95			1.08			1.72		
Co	4.12	0.4	68.0	2.35	30.4	2.49	11.2	22.3	3.10	31.1	23.1	4.35	20.0	5.2
Ni	2.30	5.73	5.78	4.24	2.97	3.68	2.76	5.40	2.62	6.58	3.55	6.62	6.89	5.75
Ga	15.19	17.5	27.0	13.49	25.6	15.47	21.1	25.1	14.53	24.7	25.3	16.50	28.5	
La	40.18	61.2	69.0	19.64	72.40	32.89	53	72.6	24.85	28.3	62.8	82.38	92.50	102.42
Ce	83.94	130	117	31.99	99.00	56.07	114	104	48.39	92.10	127	137.88	192.00	186.69
Pr	8.64	10.8	15.1	4.51	13.40	6.52	109	17.0	5.57	8.22	13.6	16.44	20.00	22.00
Nd	32.45	36.9	53.4	17.62	44.30	24.29	36.8	56.9	20.51	26.30	48.2	60.54	69.40	69.19
Sm	5.47	6.40	8.43	3.10	7.40	3.87	6.22	9.97	3.59	5.71	3.01	8.51	10.80	11.68
Eu	1.30	1.23	1.83	0.43	1.00	0.99	1.03	1.21	0.35	0.68	1.45	2.40	2.97	2.94
Gd	4.77	5.62	6.54	2.72	6.48	3.49	5.22	8.84	3.01	5.13	6.69	6.94	8.21	7.61
Tb	0.69	0.81	1.04	0.42	1.08	0.50	0.97	1.48	0.44	0.97	1.09	0.87	1.30	1.24
Dy	4.08	3.98	4.47	2.60	5.25	2.98	4.889	7.53	2.53	4.90	5.1	4.69	5.22	5.52
Ho	0.79	0.93	1.00	0.52	1.10	0.58	1.05	1.53	0.50	1.09	1.12	0.83	1.14	1.06
Er	2.38	2.46	2.62	1.62	3.10	1.78	3.02	4.17	1.52	3.22	3.06	2.44	2.99	2.83
Tm	0.34	0.47	0.46	0.24	0.51	0.27	0.49	0.66	0.23	0.53	0.51	0.33	0.50	0.47
Yb	2.13	3.01	2.57	1.52	2.98	1.61	2.92	3.77	1.36	3.12	2.94	2.12	2.53	2.86
Lu	0.34	0.53	0.42	0.23	0.47	0.27	0.45	0.58	0.21	0.51	0.47	0.36	0.47	0.45
∑REE	187.50	264.30	283.90	87.17	258.50	136.10	339.06	290.24	113.04	180.78	277.04	326.72	433.40	416.96
Sm/Nd	0.17	0.17	0.16	0.18	0.17	0.16	0.18	0.17	0.18	0.22	0.06	0.14	0.17	0.17
(La/Yb) _N	12.70	13.71	18.10	8.74	16.38	13.76	12.24	12.98	12.35	6.115	14.40	26.15	24.65	24.14
(La/Sm) _N	4.62	6.02	5.15	3.98	6.15	5.34	5.36	4.58	4.35	3.12	13.12	6.09	5.39	5.52
(Gd/Lu) _N	1.76	1.32	1.94	1.46	1.71	1.63	1.44	1.89	1.75	1.25	1.77	2.41	2.17	2.10
δEu	0.26	0.21	0.25	0.15	0.14	0.27	0.18	0.13	0.11	0.13	0.32	0.31	0.32	0.31

岩石名称同表 1, N 表示球粒陨石标准化后的比值; * 引自区调报告^① 其余样品由南京大学成矿作用国家重点实验室 X 射线荧光光谱仪分析。

所有样品的 Rb、Sr、Ba 等大离子亲石元素 (LILE) 和 Nb、Ta、Zr、Hf 等高场强元素 (HFSE) 含量远高于原始地幔 (Sun and McDonough, 1989) 的相应值。Rb 的含量总体上随 SiO_2 含量的增加而增加, Sr 在 $K_{1,y}^1$ 中最高, 在其他岩性段 (包括侵入岩) 随 SiO_2 含量的增加呈下降趋势, Ba 也呈下降趋势。过渡元素中 V、Ni、Sc 等随 SiO_2 含量的增加显著降低, Co

则无明显的变化。以上均反映矿物结晶分离作用是岩浆演化的重要途径。

在 MORB 标准化不相容元素配分图 (图 4) 上, 所有岩石样品都表现为高场强元素 (HFSE) 亏损, 形成低谷, 而大离子亲石元素 (LILE) 富集, 构成峰尖, 为强不相容元素富集型, 且 LILE/HFSE 比值较高, 可能说明它们形成的大地构造环境总体上属活动大

① 浙江省区调队, 1995, 1:5 万大荆幅、温岭县幅、虹桥镇幅、楚门镇幅区域地质调查报告。

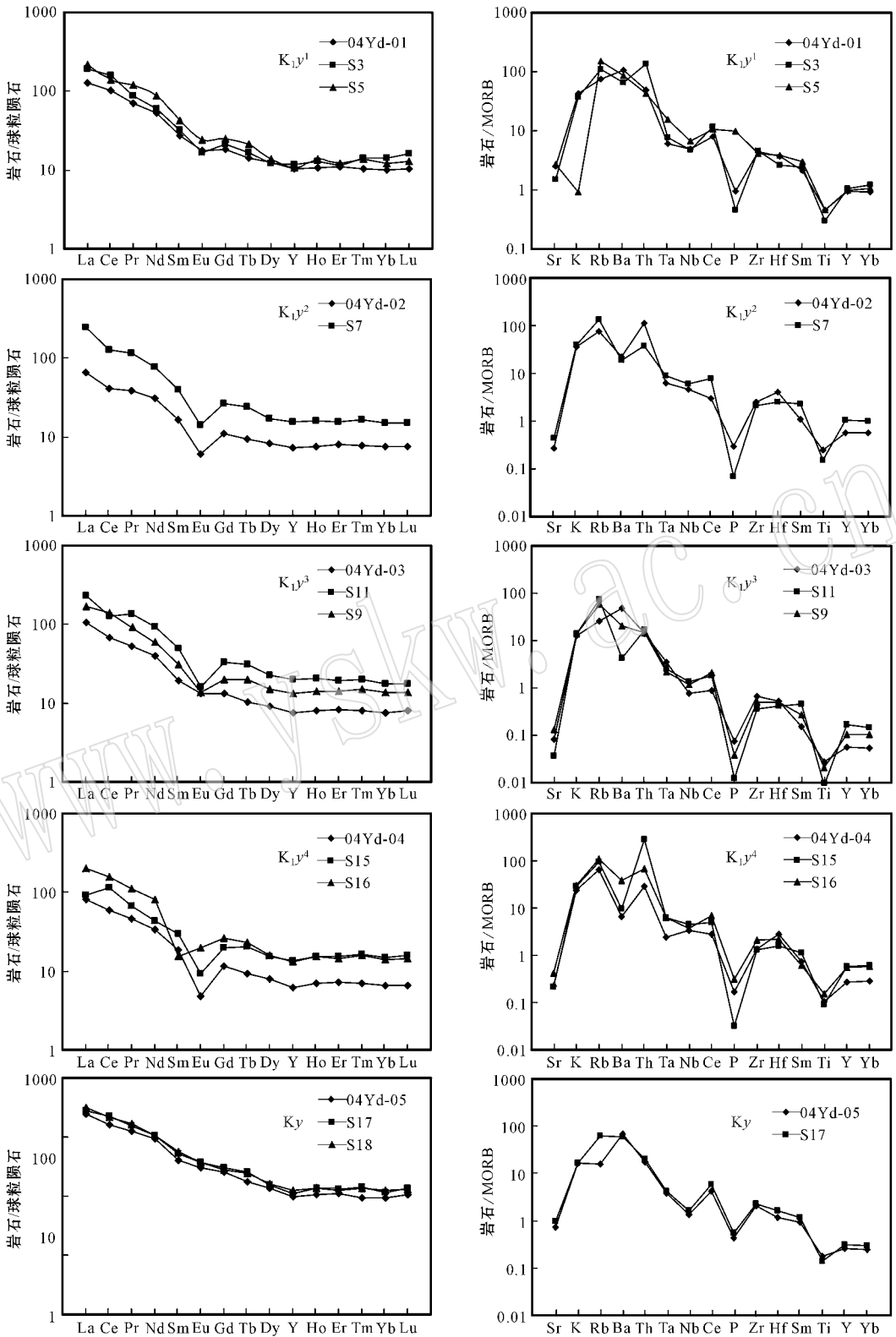


图 4 岩石球粒陨石标准化稀土元素配分图、微量元素 MORB 标准化蛛网图 [球粒陨石值据 Boynton (1984), MORB 值据 Sun and Mcdonough (1989)]

Fig. 4 Chondrite-normalized REE patterns and MORB-normalized spider diagrams for the rocks (chondrite values from Boynton, 1984; MORB values from Sun and Mcdonough, 1989)

陆边缘,与古太平洋板块俯冲有关。另外,在各岩性段火山岩中, K_{1y}^1 火山岩的不相容元素含量最高,而从 $K_{1y}^2-K_{1y}^4$,岩石不相容元素含量依次增加,也说明 K_{1y}^1 与上覆各岩性段火山岩不属同一演化阶段。在所有火山-侵入杂岩中,最晚期的石英正长斑岩(K_y)虽有最高的不相容元素丰度,但其 SiO_2 含量明显低于火山岩,因此这不是较早的流纹质岩浆分异的产物;与火山岩相比,石英正长斑岩的不相容元素以及稀土元素含量均最高,这有两种可能原因:一是在高位硅质岩浆房中岩浆发生成分分层所致,这一现象在东南沿海中生代火山岩带并不鲜见(邢光福等,1993);二是在大量流纹质岩浆喷发后,残留于高位岩浆房中偏中性的岩浆继续朝更富碱的方向分异演化导致这一结果。

4 同位素地球化学特征

雁荡山火山-侵入杂岩的 Rb-Sr、Sm-Nd 同位素

组成列于表4,其中 K_{1y}^1 熔结凝灰岩($^{87}Sr/^{86}Sr$)较高(0.7087~0.7161,普遍 >0.7130) $\epsilon Nd(t)$ 较小(-7.42); K_{1y}^2 流纹岩($^{87}Sr/^{86}Sr$)为0.7079~0.7126(多数 >0.710) $\epsilon Nd(t)$ 为-7.70~-6.90; K_{1y}^3 熔结凝灰岩的($^{87}Sr/^{86}Sr$)为0.7089, $\epsilon Nd(t)$ 为-7.03; K_{1y}^4 熔结凝灰岩的($^{87}Sr/^{86}Sr$)为0.7092, $\epsilon Nd(t)$ 为-7.18。比较而言, K_{1y}^1 岩石虽主要为低硅流纹质,其 SiO_2 含量普遍低于 $K_{1y}^2-K_{1y}^4$ 火山岩的相应值,但($^{87}Sr/^{86}Sr$)值 K_{1y}^1 比 $K_{1y}^2-K_{1y}^4$ 高, $\epsilon Nd(t)$ 值 K_{1y}^1 比 $K_{1y}^2-K_{1y}^4$ 小, $K_{1y}^2-K_{1y}^4$ 各岩性段 Sr、Nd 同位素组成较为接近,说明在第1次破火山形成前后,雁荡山火山岩的物质来源已发生了一定程度的变化,即早期火山岩浆主要为壳源,而破火山形成后晚期火山岩浆中幔源组分已有增加,反映了在破火山的形成过程中,深部壳幔作用也在加强。石英正长斑岩($^{87}Sr/^{86}Sr$)为0.7086~0.7098, $\epsilon Nd(t)$ 为-7.68~-7.10,与晚期火山岩很接近,基本属同源岩浆不同演化阶段和

表4 雁荡山火山-侵入杂岩 Sr、Nd 同位素组成

Table 4 Sr - Nd isotopes of the volcano-intrusive complex in the Yandang Mountain

序号	样号	岩性	层位	年龄 /Ma	$\frac{\epsilon_{Rb}}{10^{-6}}$	$\frac{\epsilon_{Sr}}{10^{-6}}$	$^{87}Rb/^{86}Sr$	$^{87}Sr/^{86}Sr$	$(^{87}Sr/^{86}Sr)$	$\frac{\epsilon_{Sm}}{10^{-6}}$	$\frac{\epsilon_{Nd}}{10^{-6}}$	$\frac{^{147}Sm}{^{144}Nd}$	$\frac{^{143}Nd}{^{144}Nd}$	$\epsilon Nd(t)$	
1	04YD-01	熔结凝灰岩	K_{1y}^1	97.2	153.6	248	1.787	0.71121	0.7087	7.089	42.42	0.1011	0.51220	-7.42	
2	04YD-02	流纹岩	K_{1y}^2	105.6	172.7	58.33	8.546	0.72094	0.7082	7.727	44.48	0.1051	0.51218	-7.70	
3	04YD-03	熔结凝灰岩	K_{1y}^3	104.3	146.5	134.4	3.144	0.71326	0.7089	7.528	45.11	0.101	0.51222	-7.03	
4	04YD-04	熔结凝灰岩	K_{1y}^4	99.3	157.3	57.31	7.922	0.72028	0.7092	6.266	34.69	0.1093	0.51221	-7.18	
5	04Yd-05	石英正长斑岩	K_y	98.3	104.0	294.8	1.107	0.71015	0.7086	10.54	71.67	0.0899	0.51218	-7.68	
6	125-16DL	流纹岩			173	30	15.17639	0.73520	0.7126					-7.16	
7	125-16DL	流纹岩			172	106	8.00249	0.72262	0.7107						
8	125-16DL	流纹岩	K_{1y}^2	104.3	106	25	11.51402	0.72835	0.7112						
9	125-16DL	流纹岩			226	36	12.20781	0.72970	0.7116						
10	125-16DL	流纹岩			89	58	5.93701	0.71920	0.7104						
11	Z-47	流纹岩			110.2	50.37	6.335	0.71736	0.7079	5.99	29.19	0.1241	0.5122		-6.9
12	3055-2	熔结凝灰岩			150	244	5.63724	0.72394	0.7161						
13	3055-6	熔结凝灰岩			156	138	0.16696	0.71377	0.7135						
14	3055-8	熔结凝灰岩	K_{1y}^1	98.0	203	75	3.10795	0.71886	0.7145						
15	3055-11	熔结凝灰岩			131	70	3.30748	0.71926	0.7147						
16	3055-13	熔结凝灰岩			148	224	6.48112	0.72501	0.7160						
17	126-17DL-4	石英正长斑岩			107	275	1.11488	0.71132	0.7098						
18	126-17DL-8	石英正长斑岩			101	306	0.94762	0.71099	0.7097						
19	126-17DL-9	石英正长斑岩	K_y	98.3	61	835	0.21024	0.70986	0.7096						
20	126-17DL-10	石英正长斑岩			88	434	0.59869	0.71042	0.7096						
21	126-17DL-12	石英正长斑岩			53	340	0.45545	0.71019	0.7096						
22	ZI-513	石英正长斑岩			110.6	312.5	1.024	0.71020	0.7088	10.60	71.39	0.0898	0.5122		-7.1

资料来源:1~5为本文分析,由宜昌地质矿产研究所采用 MAT-261 可调多接收质谱计分析,6~10、12~21 引自浙江省地质矿产厅(1995),11 引自 Lapierre 等(1997),22 引自陈江峰等(1992)。采样地点:1 采自芙蓉宾馆旁,2、11 采自马鞍岭隧道口,3、4 采自方洞至百岗尖的公路上,6~10 采自方洞,12~16 采自五峰山,5、17~22 采自雁荡山百岗尖。 K_{1y}^1 、 K_{1y}^2 、 K_{1y}^4 火山岩年龄为锆石 SHRIMP 测年数据(余明刚等,2006), K_{1y}^3 年龄参照 K_{1y}^2 , K_y 年龄参照 K_{1y}^4 。

不同产出形态的产物。

Sr、Nd 同位素相关图能有效地提供关于岩浆物质来源的信息。在 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}) - \epsilon\text{Nd}(t)$ 相关图(图 5)上,雁荡山火山-侵入杂岩投影区范围明显偏离地

幔系列线而趋于 EM II,与智利北部和秘鲁火山岩投影点范围大部分重合,表明它们相当于较亏损的地幔端员与 EM II 混合的产物,也即均属同熔型岩浆岩,物质来源主要来自壳源,但有地幔组分参与。

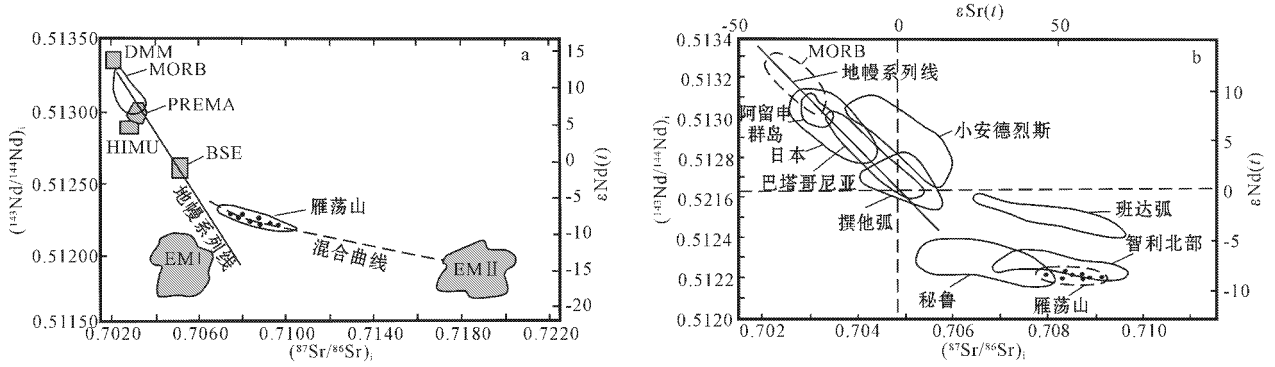


图 5 岩石 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}) - \epsilon\text{Nd}(t)$ 相关图 a 据 Zindler 和 Har(1986) b 据 Faur(1986)

Fig. 5 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}) - \epsilon\text{Nd}(t)$ correlation diagram of the studied rock (a after Zindler and Hart, 1986; b after Faure, 1986) DMM—亏损地幔; MORB—大洋中脊玄武岩; HIMU—高 U/Pb 异常地幔; BSE—总体地球; PREMA—通用地幔; EM I—I 型富集地幔; EM II—II 型富集地幔
 DMM—depleted mantle; MORB—ocean ridge basalt; HIMU—high U/Pb anomalous mantle; BSE—overall earth; PREMA—general mantle; EM I—I type enriched mantle; EM II—II type enriched mantle

5 成因与构造背景讨论

众多研究表明,中国东南大陆晚中生代大规模酸性火山岩的成因与玄武岩浆底侵导致中下地壳熔融有关(翁世劭等,1987;汪中杰等,1989;邢光福等,1993;杨祝良,1993;李惠民等,1995;谢家莹等,1996;薛怀民等,1996;陆志刚等,1997;Xu et al., 1999;陈荣等,1999;周新民等,2000;王德滋等,2002;谢昕等,2003;Xing et al., 2004),区域晚中生代玄武岩浆来源于富集型岩石圈地幔(邢光福等,1993;杨祝良等,1999;Xing et al., 2004),其过程是:玄武岩浆底侵于下地壳,引发中下地壳广泛熔融形成酸性岩浆,同时酸性岩浆层的屏蔽作用又阻碍了幔源基性岩浆继续上升(Huppert and Spark, 1998),此时,在两种岩浆的界面附近出现包括热扩散、同位素交换及化学混合等效应,其中同位素交换的速率远比其他组分的交换速率快(Lesher, 1990)。浙东白垩纪酸性岩类 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})$ 为 $0.7057 \sim 0.7084$ (平均 0.7076), $\epsilon\text{Nd}(t)$ 为 $-7.3 \sim -4.6$ (平均 -6.1), 基性岩类 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})$ 为 $0.7050 \sim 0.7081$, $\epsilon\text{Nd}(t)$ 为

$-6.32 \sim -3.54$ (平均 -5.08)^①。邢光福等(1999)统计东南沿海区域上晚中生代流纹岩类的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})$ 值为 $0.7057 \sim 0.7145$, $\epsilon\text{Nd}(t)$ 为 $-11 \sim -1.9$, 晚中生代玄武岩 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})$ 为 $0.7055 \sim 0.7106$, $\epsilon\text{Nd}(t)$ 为 $-10.6 \sim +1.2$ 。上述统计均表明晚中生代基性岩类和酸性岩类的同位素比值十分接近,反映基性和酸性岩浆曾在深部共存并发生过同位素交换。

雁荡山火山-侵入杂岩的成因也可用上述玄武质岩浆底侵作用得到很好的解释。例如,虽然雁荡山以流纹质岩浆活动为主,缺乏基性-中性岩石类型,但在雁荡山早期破火山形成的先后,其最早的 K_1y^1 与晚期 $K_1y^2-K_1y^4$ 火山岩之间 SiO_2 、稀土与微量元素及 Sr、Nd 同位素组成之间不协调的变化,已明显反映出后期幔源岩浆更多地参与到火山岩浆的起源过程之中,揭示了壳幔作用是雁荡山火山作用的深部机制。一般对高位酸性岩浆房而言,火山喷出物仅占岩浆总量的很少一部分。前已述及,雁荡山火山岩层厚达 2000 m 左右,喷发时间相对集中于 $97.2 \sim 105.6$ Ma(余明刚等,2006),且岩性主要为流纹质,而且后期沿破火山环形与放射状断裂侵入的岩墙和岩脉也主要为英安玢岩、流纹斑岩、斜长

① 南京地质矿产研究所. 2004. 1:25 万嵊县幅区域地质调查成果报告, 1~332.

霏细斑岩、霏细斑岩等酸性岩类,这些均说明在深部形成的酸性岩浆体积巨大,上升后地壳浅部汇聚成巨型高位硅质岩浆房,随之发生的喷发速率相当快,这可能就是幔源基性岩浆和酸性岩浆共存时间短并被酸性岩浆房屏蔽而未能喷出、甚至未能在浅部侵入的原因。雁荡山地处中国滨太平洋构造域,但其究竟处于典型的活动大陆边缘还是更靠近板内一侧,还有待进一步探讨。

夏林圻(2001)认为,汇聚板块边缘火山岩系含有大量钙碱性火山岩,其 TiO_2 含量偏小(平均值小于1%), Zr/Y 值小于3.5, Ti/Y 值小于500。此外, Salters 和 Hart(1991)发现活动大陆边缘区火山岩 La/Nb 比值普遍较高(>2)。雁荡山火山-侵入杂岩的 Zr/Y 平均值为8.88, Ti/Y 平均值为218.08, TiO_2 平均为0.82%,火山岩 La/Nb 平均为3.7,均反映出汇聚板块边缘产物的特征。但雁荡山火山岩的 Ba/La 变化于3.34~49.25之间,平均为22.86,不同于典型的板块俯冲作用有关的岛弧火山岩 [Ba/La 值大于30 (Tamimount *et al.*, 1998)]。在判别花岗岩构造环境的 $Hf - Rb/10 - 3Ta$ 图解(图6)以及 $Rb - (Y + Nb)$ 相关图和 $Nb - Y$ 相关图(图7)中,雁荡山岩石样品也主要落入板内区或板内区和火山弧区交界部位(图7)。

因此,雁荡山火山岩浆活动的构造背景不是典

型的岛弧或安第斯型活动大陆边缘,而是带有一定板内构造环境特征,换言之,即活动大陆边缘靠近板内的构造环境。

6 结论

(1)雁荡山主体为一白垩纪火山岩浆活动形成的复活破火山,由4个火山岩岩性段(K_1y^1 、 K_1y^2 、 K_1y^3 、 K_1y^4)和1个中央侵入体(K_y)构成。雁荡山

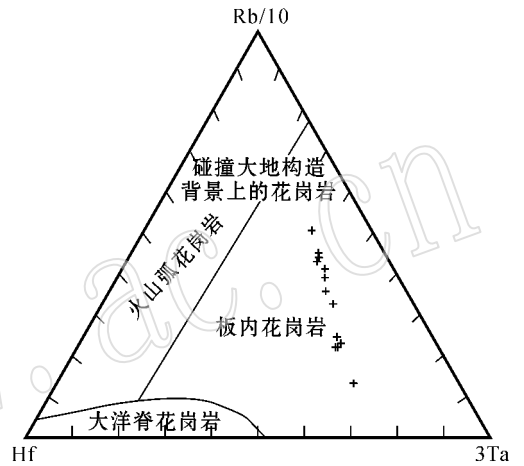


图6 岩石 $Hf - Rb/10 - 3Ta$ 判别图解(据 Harris 等, 1986)
Fig. 6 $Hf - Rb/10 - 3Ta$ diagram of the studied rocks (after Harris *et al.*, 1986)

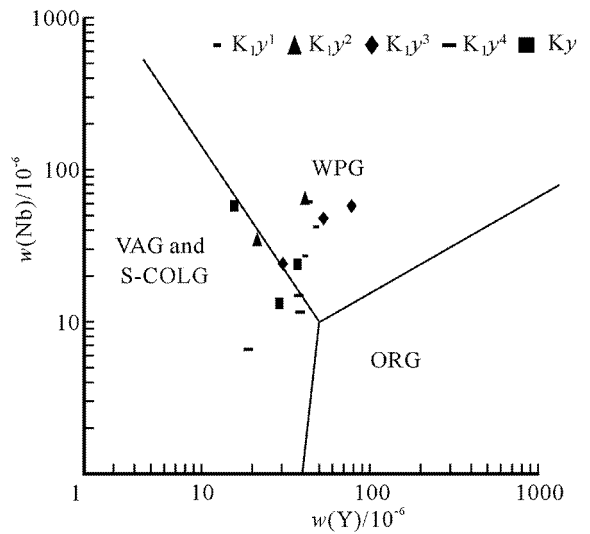
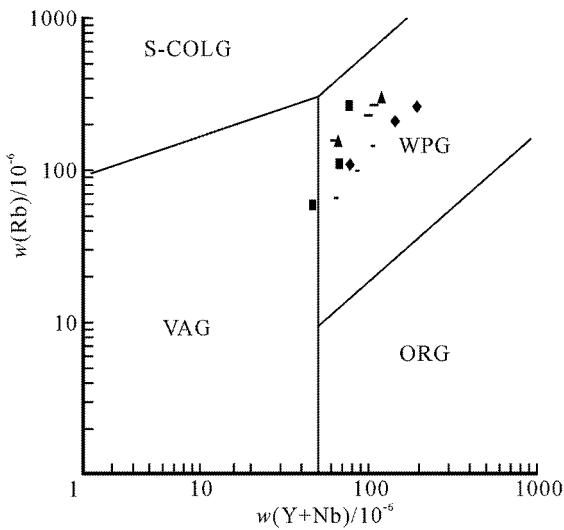


图7 岩石 $Rb - (Y + Nb)$ 与 $Nb - Y$ 图解(据 Pearce 等, 1984)

Fig. 7 $Rb - (Y + Nb)$ and $Nb - Y$ diagrams of the studied rock (after Pearce *et al.*, 1984)

ORG—洋脊花岗岩; WPG—板内花岗岩; VAG—火山弧花岗岩; S-COLG—同碰撞花岗岩

ORG—ocean ridge granites; WPG—intraplate granites; VAG—volcanic arc granites; S-COLG—syntectonic collision granites

破火山经历了 4 期喷发、2 次塌陷、1 次侵入、现代地貌形成, 共计 8 个演化阶段。

(2) 雁荡山火山岩为一套以流纹质为主的高钾钙碱性系列岩石组合, 中央侵入体为橄榄安粗岩系列石英正长斑岩, 都为铝饱和或铝过饱和类型, 并且火山岩与侵入岩为岩浆不同阶段分异演化产物。

(3) 雁荡山火山-侵入杂岩富轻稀土和大离子亲石元素, 负锶异常明显, 且亏损高场强元素, 反映其形成于活动大陆边缘环境, 长石等矿物的结晶分异作用是岩浆演化的重要途径; 它们的 Sr、Nd 同位素组成接近, 表明属同源岩浆分异演化的产物, 物质来源主要为陆壳, 但也有地幔物质参与。

(4) 在雁荡山第 1 次破火山形成前后, 火山岩浆物质来源发生一定变化, 表现为在 4 个岩性段的火山岩中, K_1y^1 低硅质火山岩有最高的稀土元素(包括轻稀土元素)总量和不相容元素丰度, 且更富放射性成因 Sr、Nd 同位素, 反映其物质来源主要为陆壳组分, 而破火山形成后喷发的 K_1y^2 — K_1y^4 各岩性段火山岩更富硅质, 却有较多幔源物质参与, 与 K_1y^1 火山岩为同源岩浆不同阶段分异演化的产物。

(5) 雁荡山火山岩浆形成的大地构造背景, 不是典型的岛弧或安第斯型活动大陆边缘, 而是活动大陆边缘靠板内的环境。

致谢 本文是第一作者研究生论文的一部分, 在那光福研究员、隗合明教授的指导下完成, 论文编写过程中得到了陶奎元、陈荣、沈加林等老师的帮助, 野外工作得到了浙江省雁荡山风景旅游管理局的大力协助, 在此一并表示感谢!

References

Boynnton W V. 1984. Cosmochemistry of the rare earth element: meteorite studies [A]. Henderson P. Rare Earth Element Geochemistry [C]. New York: Elsevier.

Chen Jiangfeng, Zhou Taixi, Li Xueming, et al. 1992. Sr and Nd isotopic composition and tectonic signification of Mesozoic magma in the southeast China [A]. Li Jiliang. The Structure and Evolvement Study on Sea and Triphibian Lithosphere of Southeastern China [C]. Beijing: Chinese Science and Technology Publishing House, 119~130 (in Chinese with English abstract).

Chen Rong and Zhou Jincheng. 1999. Information of crust-mantle interaction implied in Early Cretaceous composite lavas and dikes from Eastern Zhejiang [J]. Geological Review, 45(Sup.): 785~795 (in Chinese with English abstract).

Du Yangsong, Wang Dezi and Chen Kerong. 1989. On Characteristics, Evolution and Origin of Acidic-Intermediate Acidic Volcano-Intrusive

sive Complexes-Exemplified by Those in the Coastal Area of South-eastern Zhejiang Province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 141~147 (in Chinese with English abstract).

Faure G. 1986. Principles of Isotope Geology (2nd ed.) [M]. New York: John Wiley and Sons, 100~245.

Feng Changgen, Yu Yunwen and Dong Yaohong. 1997. Petrogenetic sources and characteristics of Yandangshan caldera, Zhejiang Province [J]. Geology of Zhejiang, 13(1): 18~25 (in Chinese with English abstract).

Harris N B W, Pearce J A and Tindle A G. 1986. Geochemical characteristics of collision-zone magmatism [A]. Coward M P and Reis A. Collision Tectonic [C]. Spec. Publ. Geol. Soc. Lond., 19, 67~81.

Huppert H E and Spark R S J. 1988. The generation of granitic magmas by intrusion of basalt into continental crust [J]. J. Petrol., 29(3): 559~624.

Laperrie H, Jahn B M, Charvet J, et al. 1997. Mesozoic felsic arc magmatism and continental olivine tholeiites in Zhejiang Province and their relationship with the tectonic activity in southeastern China [J]. Tectonophysics, 274: 321~338.

Le Bas M J. 1986. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram [J]. Petro. 27: 745~750.

Leshner C E. 1990. Decoupling of chemical and isotopic exchange during magma mixing [J]. Nature, 344: 235~237.

Li Huimin, Dong Chuanwan, Xu Xisheng, et al. 1995. Single zircon U-Pb dating of gabbros in Quanzhou: origin of basic igneous rocks in southeastern Fujian Province [J]. Chinese Science Bull., 40(2): 158~160 (in Chinese with English abstract).

Lu Zhigang, Tao Kuiyuan, Xie Jiaying, et al. 1997. Volcanic Geology and Mineral Resources of Southeast China Continent [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~431 (in Chinese with English abstract).

Pearce J A, Harris N B W and Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonics interpretation of granitic rocks [J]. J. Petrol., 25: 956~983.

Rickwood P C. 1989. Boundary lines within petrogenetic diagrams which use oxides of major and minor elements [J]. Lithos, 22: 247~263.

Salters V T M and Hart S R. 1991. The mantle sources of ocean ridges, island arcs: the Hf-isotope connection [J]. Earth Planet Sci. Lett., 104: 364~380.

Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalt: implications for mantle composition and processes [A]. Saunders A D & Norry M J. Magmatism in the Ocean Basin [C]. Geological Society Special Publication, 42: 313~345.

Tamimount A, Dominique W, Andre G, et al. 1998. Coeval potassic and sodic calc-alkaline series in the post-collisional Hercynian Tanherfi intrusive complex, northeastern Morocco: geochemical, isotopic and geochronological evidence [J]. Lithos, 45: 371~393.

Tao Kuiyuan, Xing Guangfu, Yang Zhuliang, et al. 2000. Determination of and discussion on the ages of Mesozoic volcanic rocks in Zhejiang—comments on the argumentation of Lapierre et al. [J]. Geological Review, 46(1): 14~20 (in Chinese with English abstract).

Tao Kuiyuan, Yu Minggang, Xing Guangfu, et al. 2004. The value and global comparison of Cretaceous Mt. Yandangshan caldera geologic heritage [J]. Resources Survey & Environment, 25(4): 297~303 (in Chinese with English abstract).

Taylor S R. 1979. Chemical composition and evolution of the continental crust: the rare element evidence [A]. Mcelhiny. The Earth, Its Origin, Structure and Evolution [C]. London: Academic Press, 353~372.

Wang Dezi and Zhou Xinmin. 2002. Origin of Mesozoic Volcanic-Intrusive Complexes of Southeast China and Crustal Evolution [M]. Beijing: Science Press, 133~134 (in Chinese with English abstract).

Wang Kongzhong, Zhu Chaohui and Yu Yunwen. 2001. Discussion on the stratigraphic of Late Mesozoic volcanic-sedimentary rocks in Yandangshan areas, Zhejiang Province [J]. *Geology of Zhejiang*, 17(1): 6~18 (in Chinese with English abstract).

Wang Zhongjie, Xie Jiaying, Yin Jiaheng, et al. 1989. Volcanic cycles, structures rock series and magma evolution for the Zhejiang-Fujian-Jiangxi Mesozoic volcanic terrane [research report I]. *Bulletin of the Nanjing Institute of Geology and Mineral Resources, Chinese academy of Geological Sciences*, (sup.): 1~22 (in Chinese with English abstract).

Weng Shijie, Kong Qingshou and Huang Hai. 1987. Late Mesozoic Volcanism of Zhejiang, Fujian, Jiangxi and Guangdong [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~290 (in Chinese with English abstract).

Xia Linqi. 2001. A study of volcanic rocks in orogenic belts [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 20(3): 225~232 (in Chinese with English abstract).

Xie Jiaying, Tao Kuiyuan, Yin Jiaheng, et al. 1996. Mesozoic Volcanic geology and Volcano-Intrusive Complexes of Southeast China Continent [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~277 (in Chinese with English abstract).

Xie Xin, Xu Xisheng, Xing Guangfu, et al. 2003. Geochemistry and genesis of early Cretaceous volcanic assemblages in eastern Zhejiang [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 19(3): 385~398 (in Chinese with English abstract).

Xing Guangfu, Tao Kuiyuan and Yang Zhuliang. 1993. Study on petrogeneses of Shanmen bimodal volcanic rocks from Wenzhou, Zhejiang [J]. *Acta Petrologica Sinica*, (Sup.): 1~13 (in Chinese with English abstract).

Xing Guangfu, Yang Zhuliang, Chen Rong, et al. 2004. Three stage Mesozoic bimodal igneous rocks and their tectonic implications in the continental margin of Southeast China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 78(1): 27~39.

Xing Guangfu, Yang Zhuliang, Xue Huaimin, et al. 1999. Sr and Nd isotopic compositions and Petrogenetic implications of Cretaceous bimodal volcanic rocks in eastern Zhejiang, China [J]. *Geological Review*, 45(Sup.): 796~804 (in Chinese with English abstract).

Xu Xisheng, Dong Chuangwan, Li Wuxian, et al. 1999. Late Mesozoic intrusive complexes in the coastal area of Fujian, SE China: the significance of the gabbro-diorite-granite association [J]. *Lithos*, 46: 299~315.

Xue Huaimin, Tao Kuiyuan and Shen Jialin. 1996. Sr and Nd isotopic characteristics and magma genesis of Mesozoic volcanic rocks along the coastal region of southeastern China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 70(1): 35~47 (in Chinese with English abstract).

Yang Zhuliang. 1993. Sources and evolutions of Mesozoic and Cenozoic basalts in eastern Zhejiang Province and their mantle metasomatism [J]. *Volcanology & Resources*, 14(3): 7~20 (in Chinese with English abstract).

Yang Zhuliang, Tao Kuiyuan, Shen Weizhou, et al. 1999. Sr, Nd and Pb isotopic characteristics of early Cretaceous basaltic rocks from the coast of Zhejiang and Fujian: Evidence for ancient enriched mantle source [J]. *Scientia Geologica Sinica*, 34(1): 59~68 (in Chinese with English abstract).

Yu Minggang, Xing Guangfu, Shen Jialin, et al. 2006. Chronologic study on volcanic rocks in the Mt. Yandangshan World Geopark [J]. *Acta geologica sinica*, 80(11): 1683~1690 (in Chinese with English abstract).

Zhou Xinmin and Li Wuxian. 2000. Origin of late Mesozoic igneous rocks in southeast China: implications for lithosphere subduction and underplating of mafic magmas [J]. *Progress in Natural Science*, 326: 269~287 (in Chinese with English abstract).

Zindler A and Hart S R. 1986. Chemical geodynamics. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 14: 493~571.

附中文参考文献

陈江峰, 周泰禧, 李学明, 等. 1992. 中国东南地区中生代岩浆岩的 Sr、Nd 同位素组成及其大地构造意义 [A]. 李继亮. 中国东南海陆岩石圈结构与演化研究 [C]. 北京: 中国科学技术出版社, 119~130.

陈荣, 周金城. 1999. 浙东早白垩世复合岩流和岩墙中蕴含的壳幔作用信息 [J]. *地质论评*, 45(增刊): 785~795.

杜杨松, 王德滋, 陈克荣. 1989. 浙东南沿海中生代火山-侵入杂岩 [M]. 北京: 地质出版社, 141~147.

冯长根, 俞云文, 董尧鸿. 1997. 雁荡山破火山口构造特征及成岩物质来源 [J]. *浙江地质*, 13(1): 18~25.

李惠民, 董传万, 徐夕生, 等. 1995. 泉州辉长岩中单颗粒锆石 U-Pb 法定年——闽东南基性岩浆的起源 [J]. *科学通报*, 40(2): 158~160.

陆志刚, 陶奎元, 谢家莹, 等. 1997. 中国东南大陆火山地质及矿产 [M]. 北京: 地质出版社, 1~431.

陶奎元, 邢光福, 杨祝良, 等. 2000. 浙江中生代火山岩时代厘定和问题讨论——兼评 Lapierre 等关于浙江中生代火山活动时代的论述 [J]. *地质论评*, 46(1): 14~20.

陶奎元, 余明刚, 邢光福, 等. 2004. 雁荡山白垩纪破火山地质遗迹价值与全球对比 [J]. *资源调查与环境*, 25(4): 297~303.

王德滋, 周新民. 2002. 中国东南部晚中生代花岗质火山-侵入杂岩成因与地壳演化 [M]. 北京: 科学出版社, 133~134.

王孔忠, 朱朝晖, 俞云文. 2001. 浙江雁荡山地区晚中生代火山-沉积岩系地层归属讨论 [J]. *浙江地质*, 17(1): 6~18.

王中杰, 谢家莹, 尹家衡, 等. 1989. 赣中生代火山岩区火山旋回、火山构造、岩石系列及演化 (研究报告) [J]. *南京地质矿产研究所所刊*, (增刊): 1~220.

翁世劫, 孔庆寿, 黄海. 1987. 浙闽赣粤中生代晚期火山地质 [M]. 北京: 地质出版社, 1~290.

夏林圻. 2001. 造山带火山岩研究 [J]. *岩石矿物学杂志*, 20(3): 225~232.

谢家莹, 陶奎元, 尹家衡, 等. 1996. 中国东南大陆中生代火山地质及火山-侵入杂岩 [M]. 北京: 地质出版社, 1~277.

谢昕, 徐夕生, 邢光福, 等. 2003. 浙东早白垩世火山岩组合的地球化学及其成因研究 [J]. *岩石学报*, 19(3): 385~398.

邢光福, 陶奎元, 杨祝良. 1993. 浙江温州山门双峰式火山岩成因探讨 [J]. *岩石学报*, (增刊): 1~13.

邢光福, 杨祝良, 薛怀民, 等. 1999. 浙东白垩纪双峰式火山岩 Sr、Nd 同位素组成及其成因意义 [J]. *地质论评*, 45(增刊): 796~804.

薛怀民, 陶奎元, 沈加林. 1996. 中国东南沿海中生代酸性火山岩的锶和钕同位素特征与岩浆成因 [J]. *地质学报*, 70(1): 35~47.

杨祝良. 1993. 浙江中、新生代玄武岩起源、演化与地幔交代作用 [J]. *火山地质与矿产*, 14(3): 7~20.

杨祝良, 陶奎元, 沈渭州, 等. 1999. 浙闽沿海早白垩世玄武质岩石 Sr、Nd、Pb 同位素特征: 古老富集型地幔之证据 [J]. *地质科学*, 34(1): 59~68.

余明刚, 邢光福, 沈加林, 等. 2006. 雁荡山世界地质公园火山岩年代学研究 [J]. *地质学报*, 80(11): 1684~1690.

周新民, 李武显. 2000. 中国东南部晚中生代火成岩成因: 岩石圈消减和玄武岩底侵相结合的模式 [J]. *自然科学进展*, 326: 269~287.